大断面连铸坯碳元素偏析控制*

薛志强[1],许博超[2],刘佳旭[2],石 龙[2],赵志东[2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司成都销售分公司,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 分析了圆坯连铸工艺的特点及圆坯碳元素分布特征,并对碳元素偏析形成原因进行分析和讨论。结合圆坯连铸的工艺特点和设备条件,从浇铸钢水过热度、连铸冷却制度两个方面提出了优化措施,并进行了工业试验,结晶器电磁搅拌电流控制在300 A左右、浇铸钢水过热度控制在25 ℃左右、比水量控制在0.20~0.22 L/kg能够有效地改善大断面圆坯碳元素偏析。

关键词: 大断面; 碳偏析; 冷却制度; 钢水过热度
中图分类号: TF777 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)03-0009-04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.03.003

Control of Carbon Segregation in Continuous Casting Billet with Large Section

Xue Zhi-qiang[1], *Xu Bo-chao*[2], *Liu Jia-xu*[2], *Shi Long*[2], *Zhao Zhi-dong*[2]

(1. *Chengdu Sales Branch Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Steel Tube Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The characteristics of continuous casting process for round billet and distribution of carbon element in round billet are analyzed as well as the causes of carbon segregation are analyzed and discussed. The optimum measures are put forward from such two aspects as degree of superheat of molten steel and cooling regime of continuous casting combining with the technological characteristics and equipment condition of continuous casting for round billet. Moreover, the industrial test results showed that the carbon segregation in round billet with large section could be effectively improved when the current of mold electromagnetic stirring was controlled at around 300 A, degree of superheat of molten steel was controlled at around 25 ℃ and specific water flow was controlled at 0.20~0.22 L/kg.

Key words: large section; carbon segregation; cooling regime; degree of superheat of molten steel

随着钢管公司产品结构升级,对无缝管的性能和质量要求愈加严格,因此改善连铸坯的质量成为亟待解决的问题。轧材通常在横截面上存在着不同程度的偏析缺陷,也就是化学成分的不均匀分布,这

* 收稿日期:2021-05-06
作者简介:薛志强(1984-),男,内蒙古包头市人,硕士,工程师,现从事销售技术服务工作。

中国知网 https://www.cnki.net

种缺陷会对机加工、热处理、尺寸稳定性以及使用安全性和各种应用性能带来许多不利的影响[1-2]，轧材偏析缺陷级别大小主要是由连铸坯结晶成分不均匀严重程度决定的，后续加工和热处理等过程只能减轻偏析缺陷，不能有效解决问题。结合制钢分厂大断面圆坯生产工艺特点，从影响连铸圆坯碳元素宏观偏析的主要因素(二冷制度、钢水过热度)进行分析和讨论，通过工艺改进，改善连铸圆坯碳元素的宏观偏析[3-4]。

1 宏观碳偏析因素分析

金属凝固过程中溶质分布方程:

$$Cs = KC_0(1 - f_s)k - q \quad (1)$$

$$q = (1 - \beta)(1 - v/u) \quad (2)$$

式中: Cs 为固相浓度; K 为固液交界面的平衡分配系数; C_0 为开始凝固时钢液的浓度; f_s 为凝固相分率; q 为凝固系数; β 为凝固收缩率，u 为凝固速度，v 为液体流动速度。

由上式可知，q 值对溶质的分布起决定性作用，在合金成分一定的情况下，β 为定值，则 q 值取决于 u 和 v，因此，u 和 v 是影响元素偏析的决定性外部因素。

1.1 二冷制度对圆坯碳偏析影响

连铸工艺采用不同冷却制度，对钢液凝固行为有很大的影响，进而对铸坯碳元素宏观偏析产生影响。采用合适的冷却制度，连铸坯凝固组织均匀，并在中心部位有一定比例的等轴晶，铸坯内部碳偏析最小。有文献报道[3]，碳偏析随冷却强度的增加而得到改善。但单纯增加冷却强度而不进行电磁搅拌，不如采用电磁搅拌工艺和相对较弱的冷却强度生产的铸坯碳偏析程度好。在采取较强冷却强度代替弱冷时，这一差别更加明显。根据钢管公司制钢分厂连铸二冷强度控制能力，为改善碳偏析程度采用了适当提高二冷强度、控制合适的二冷比水量(0.20～0.22 L/kg)的措施。

1.2 过热度对圆坯中碳偏析的影响

钢液浇注过热度提高，铸坯凝固散热量增大且坯壳厚度减薄，连铸坯断面温度梯度大，易偏析元素如碳、硫等有条件按照选分结晶的方式扩散凝固，从而形成明显的偏析缺陷; 在相同的浇注过热度下，拉速提高也会使凝固散热量增大，坯壳减薄，效果等同于过热度提高，导致偏析程度加大[5]。

2 试验方案及检验方法

制钢分厂试验采用 Φ430 mm 坯型 ER9 钢种，生产流程为: 转炉冶炼→LF→VD→1 机 5 流圆坯连铸。全保护浇注，结晶器电磁搅拌，末端电磁搅拌。在生产过程中，通过控制变量法，变化中包过热度，取对应条件下的铸坯试样进行碳偏析检测，见表 1。

表 1 试验方案

炉次	中包温度/℃	拉速/(m·min^{-1})	E-EMS		F-EMS		比水量/(L·kg^{-1})
			电流/A	频率/Hz	电流/A	频率/Hz	
第一炉	35	0.43	300	1.8	350	8.0	0.2
第二炉	25	0.43	300	1.8	350	8.0	0.2

待连铸坯缓冷 48 h 后，每炉沿横向截取 30～50 mm厚铸坯试样，磨床磨光断面后进行酸洗。采用 Φ6 mm 全合金钻头对酸洗检验后的铸坯样横断面进行钻孔取样。沿铸坯内外弧方向及垂直方向从中心点间隔一定的距离(15 mm)连续在铸坯的横断面上钻取试样，每块试样共计 58 点，分析碳含量，对比其碳偏析情况[3]。碳偏析取样位置见图 1、图 2。

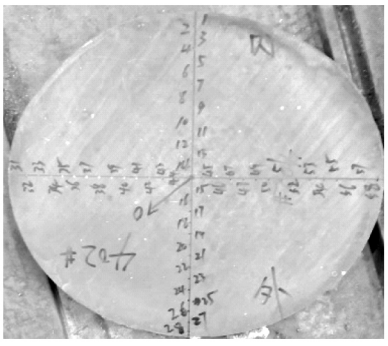


图 1 第一炉碳偏析取样位置图

中国知网 https://www.cnki.net

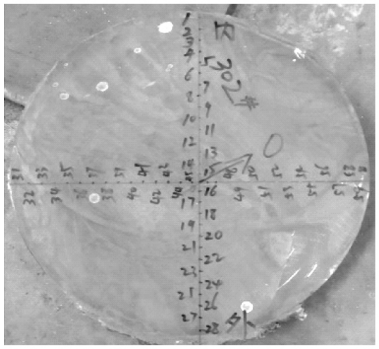


图 2　第二炉碳偏析取样位置图

3　试验结果及分析

3.1　连铸坯碳偏析

用碳偏析系数描述取样点碳偏析情况，碳偏析系数 $= \omega(C)/\omega(C_{ave})$。$\omega(C)$ 为横截面上某点的碳含量，$\omega(C_{ave})$ 为该断面上所有取样的平均值。不同过热度对碳偏析系数的影响如图 3— 图 6 所示。

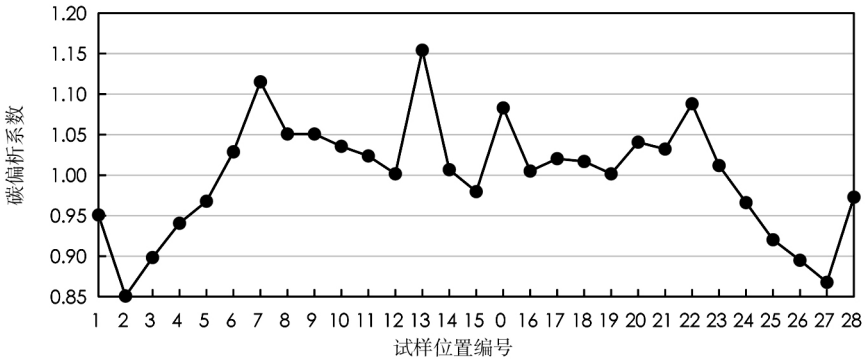


图 3　第一炉内外弧碳偏析系数分析

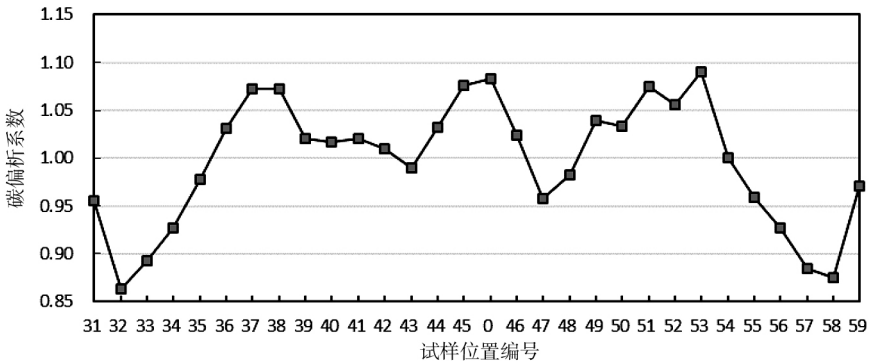


图 4　第一炉横向碳偏析系数分析

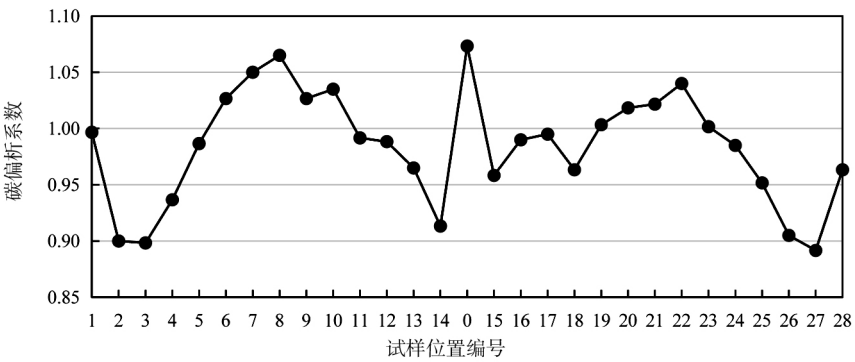


图 5　第二炉内外弧碳偏析系数分析

中国知网　https://www.cnki.net

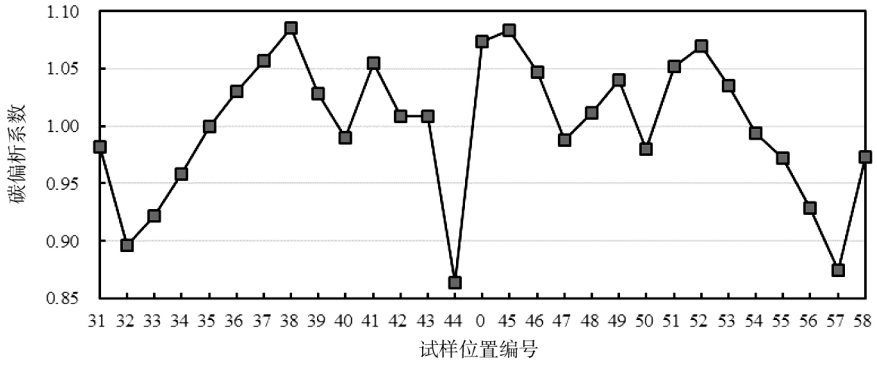


图6 第二炉横向碳偏析系数分析

连铸过程中当钢液温度冷却至固—液两相区后，由于发生选分结晶的缘故，会造成钢液溶质组元偏析。而溶质组元偏析主要与该溶质组元在固态和液态的分配系数、溶质组元在钢中的扩散速度、钢的冷却速度有关[6]。而对于某一固定的溶质组元来说，其偏析主要影响因素只有该组元在钢中的扩散系数和钢的冷却速度。连铸坯的断面尺寸对钢的冷却速度有着重要的影响，所以会对碳偏析程度造成极大的影响。当连铸坯断面尺寸增大，随着选分结晶的不断进行，导致溶质组元不断富集，从而造成较严重的偏析。从图3—图6可以看出，碳偏析最大值位于铸坯半径中间的某一位置，该区域是柱状晶向等轴晶转变(CET转变)区域，如图7所示。在CET转变区钢的冷却速度发生较大的变化，由原来的小于碳元素的扩散速度突然增大到远大于碳元素的扩散速度，导致碳元素在该处富集。

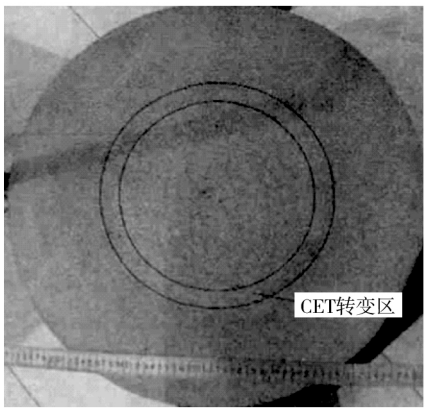


图7 圆坯CET转变区

3.2 过热度对大断面连铸坯的影响

生产过程中过热度高时，拉速会相应降低，所以在相同拉速和过热度匹配工艺下，不考虑拉速对偏析的影响。在相近的冷却强度和电磁搅拌条件下进行过热度对铸坯碳偏析影响的分析，从图3—图6可以看出，中间包浇注钢水过热度在35 ℃左右，碳偏析系数极差波动范围在0.84～1.15之间；过热度在25 ℃左右，碳偏析系数极差波动范围在0.87～1.09，反映出连铸坯碳偏析程度。较低的过热度大断面连铸坯碳偏析有所改善。考虑到正常生产要求和过热度控制水平，将过热度控制在20～30 ℃的范围内对控制碳偏析可行。

4 结束语

连铸工艺的二冷制度对铸坯碳元素宏观偏析有一定影响，随着冷却强度增加碳偏析程度改善，但冷却强度过大导致中心碳偏析严重。适当提高二冷强度，控制二冷比水量在0.2 L/kg左右，对中高碳钢连铸坯碳元素偏析有所改善。钢水过热度对高碳钢碳偏析有一定影响，浇铸钢水的过热度控制在20～30 ℃范围可以减轻中高碳钢在连铸过程中的偏析现象。通过优化连铸工艺，控制低过热度中包钢水浇铸，配合合适的结晶器电磁搅拌电流强度和二冷比水量，能够有效改善连铸坯1/2半径、1/4半径处碳偏析严重的问题。

参 考 文 献

[1] 刘永铨. 钢的热处理 [M]. 北京: 冶金工业出版社，1981.

[2] 陈得和. 钢的缺陷 [M]. 北京: 机械工业出版社，1977.

[3] 韩静. 连铸工艺参数对高碳钢小方坯中心碳偏析和凝固组织的影响 [D]. 北京: 北京科技大学，2005.

(下转第71页)

中国知网 https://www.cnki.net

短路时，造成负载回路短路，因此使负载回路不能产生振荡，使中频电源无法工作。为了找出短路的电容器，可采用解脱试验法，即每次脱开 2 支或 3 支中频补偿器，试验启动，当中频能正常启动后，说明脱下这一组中频电容器中存在击穿短路，这时可用万用表 R 档去测电容器两端，短路的电容器电阻为零，不能充上电压；正常电容器当万用表一接上时为零，以后指针逐渐向高电阻端移动，一般电阻超过 500 kΩ 以上的电容器是正常的[3]。

(2) 中频补偿电容器开路。当中频补偿电容器开路时，对中频电源正常工作没有多大影响，只是电源工作时频率比正常时高，这时只要再并几只新的中频补偿电容在槽路上，使频率达到正常值时即可。

(3) 感应器匝间短路。当感应器匝间严重短路时，中频电源无法启动工作。如感应器有两匝相碰，这时中频电源有可能启动，但频率较高，电流较大，功率稍升高就会造成逆变失败。造成此故障原因一般是由于感应器在工作时断水，把感应器匝间绝缘严重烧损所造成。在判别较困难时可用完好的感应器来替换，以确定上述故障存在与否。

(4) 通水电缆断芯。熔炼炉倒钢水时，通水软电缆与熔炉一起倾动而经常发生曲折现象。多股软电缆的断裂过程是先断掉大部分后，在大功率运行时把未断的小部分很快烧断，这时中频电源会产生很高电压，当过压保护不可靠时，会损坏逆变晶闸管。通水软电缆断开后，中频电源就无法启动工作。检查水冷电缆断芯与否，可先把软电缆与中频补偿电容器输出铜排脱开，测量时应把熔炉转到倾倒位置，使电缆吊起，这样使断开的芯线与接头彻底脱离，用万用表 R 档测量，不断时 R 为零，断开时 R 为无穷大。

(5) 中频补偿电容器、母排、软电缆等的连接螺栓松动。由于流经母排的电流很大，工作时母线的温度也较高，因此容易引起连接螺栓松动，松动后接触电阻增加，更使连接处温度升高。由于松动而产生温度过高，会造成母排连接处表面氧化，使其接触不良而产生打火现象。常由于打火干扰引起逆变失败。因此中频电源母排上所有连接螺栓应经常检查并旋紧，以避免产生接触不良和开路故障。

3　结束语

整流系统、逆变系统和负载回路良好运行是保证中频熔炼炉正常工作的前提，在使用过程中出现的故障和问题，值得我们不断探索学习及总结。分析中频熔炼炉三大系统的常见电气故障，总结常见故障的处理方法，保证控制系统的稳定性，可大大的提升设备的安全、人员的安全和生产的高效率，是中频熔炼炉的稳定运行的有效措施。

参　考　文　献

[1] 王兆安，黄俊. 电力电子技术(第四版) [M]. 北京：机械工业出版社，2006.

[2] 胡寿松. 自动控制原理(第五版) [M]. 北京：科学出版社，2007.

[3] 宋文林. 感应炉炼钢问答 [M]. 北京：机械工业出版社，1997.

(上接第 12 页)

[4] 陈峰. 结晶器电磁搅拌对中碳钢连铸大方坯中间碳偏析的影响 [D]. 北京：北京科技大学，2006.

[5] 冯军，陈伟庆. 连铸工艺参数对高碳钢小方坯中心碳偏析的影响 [J]. 特殊钢，2005，26(4)：33.

[6] 王韬，陈伟庆，闫威. 二冷强度和两种断面对 82B 钢铸坯中心碳偏析的影响 [J]. 炼钢，2012，28(6)：55－59.

中国知网　https://www.cnki.net